

ПРИНЦИП «ПРАКТИЧЕСКОГО ИСКЛЮЧЕНИЯ» В ПРОЕКТЕ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ «АККУЮ»

А.В. Любарский*, Г.В. Токмачев*, И.Б. Кузьмина**

* АО «Атомэнергопроект»

107996, Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1

** АО «РЕИН Инжиниринг»

115114, Москва, ул. Летниковская, д.10, стр. 5



Рассмотрена реализация принципа «практического исключения» при разработке проекта АЭС «Аккую», сооружаемой в Турции с реакторами типа ВВЭР-1200. Принцип сформулирован так: для аварийных последовательностей или явлений, способствующих или приводящих к неприемлемым радиологическим последствиям для населения или окружающей среды, должно быть с высоким уровнем доверия показано, что их реализация крайне маловероятна. «Практическое исключение» доказывается преимущественно результатами вероятностного анализа безопасности уровня 2. Реализация принципа рассмотрена на уровне аварийных последовательностей, приводящих к большому аварийному выбросу. Показано, что каждая из аварийных последовательностей, приводящих к неприемлемым выбросам, имеет вероятность реализации ниже $4,45E-8$ на реактор в год, при том, что суммарная их вероятность не превышает $6,17E-7$ на реактор в год. Для явлений в герметичной оболочке при тяжелых авариях, включая детонацию водорода, большой тепловой взрыв, непосредственный нагрев герметичной оболочки, превышение давления в объеме герметичной оболочки, разрушение герметичной оболочки на поздних этапах из-за расплавления фундамента, показано их «практическое исключение». Рассмотрены трудно прогнозируемые специфические сценарии запроектных аварий, для которых оценивается применимость принципа «практического исключения»: значительный ввод положительной реактивности, разрыв корпуса реактора и других крупномасштабных элементов, разрушение твэлов в бассейне выдержки, тяжелые аварии с байпасом герметичной оболочки или ее разгерметизации, а также тяжелые аварии со средствами устранения их последствий, находящимися в неработоспособном состоянии. Разработаны и применены критерии оценки «практического исключения». В вероятностном анализе безопасности уровня 2 выполнен анализ чувствительности, показавший, что оцененные значения мало зависят от допущений и предположений анализа, а также от случайного изменения параметров, влияющих на развитие тяжелых аварий.

Ключевые слова: атомная станция, разработка проекта, безопасность, принцип «практического исключения», вероятностный анализ безопасности уровня 2.

Для цитирования: Любарский А.В., Токмачев Г.В., Кузьмина И.Б. Принцип «практического исключения» в проекте атомной электростанции «Аккую». // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 19-30. DOI: <https://doi.org/10.26583/pre.2023.3.02>

ВВЕДЕНИЕ

Неснижаемый вклад в вероятностные показатели безопасности в большинстве случаев вносят так называемые «практически исключенные» события, против которых в проекте АЭС не предусматриваются непосредственные защитные меры. Если такие события вносят доминантный вклад в оцененный профиль риска, то следует признать, что возможности повышения безопасности исчерпаны, и тогда должно быть принято решение в отношении того, приемлем ли радиационный риск с экономической и социальной точек зрения.

К настоящему времени история термина «практическое исключение» насчитывает почти 25 лет [1]. Изначально в мировую практику термин был введен публикацией Международной консультативной группы по ядерной безопасности (INSAG) МАГАТЭ в 1999 году [2]. Хотя в последующие 20 лет термин и был использован в нескольких стандартах по безопасности МАГАТЭ, например, в [3] и [4], определение термина было сформулировано МАГАТЭ в словаре по безопасности только в 2018 году [5].

Параллельно термин «практическое исключение» ввели в практику Европейские эксплуатирующие организации в своих требованиях (EUR). Определение термина EUR и МАГАТЭ практически не отличается, причем в EUR оно сформулировано раньше.

Принцип «практического исключения» заключается в соответствии с определением EUR в следующем: аварийные последовательности или явления, способствующие или приводящие к неприемлемым радиологическим последствиям для населения или окружающей среды, должны быть либо физически невозможны, либо должно быть показано с высоким уровнем доверия, что их реализация крайне маловероятна [6].

Следует отметить, что обосновать «физическую невозможность» как аварийных последовательностей (АП), так и явлений, способствующих или приводящих к неприемлемым радиологическим последствиям, невозможно, за исключением крайне ограниченного спектра в силу того, что с вероятностной точки зрения почти любое событие возможно.

Примеры

1. Расчеты показывают, что реактивной силы при вылете корпуса реактора в случае тяжелой аварии с высоким давлением в реакторе в момент разрушения днища реактора недостаточно для разрушения герметичной оболочки. Эти расчеты выполняются с большим запасом консерватизма, однако несмотря на заложенный консерватизм существует ненулевая вероятность, что некоторые из определяющих явление факторов (такие как свойства материалов и давление в корпусе в момент разрушения) могут с крайне низкой вероятностью отличаться от принятых в расчете в такой степени, что герметичная оболочка все же разрушится.

2. В проекте используется сухая шахта реактора, и внекорпусной паровой взрыв предполагается физически невозможным, однако, всегда существует ненулевая вероятность, что шахта была заполнена водой либо в результате течи через трещины в днище корпуса до начала тяжелой аварии, либо из-за попадания воды в шахту вообще до начала отклонения от нормальной эксплуатации из-за ошибки оператора.

По сути «физически невозможными» могут быть только те явления, которые в принципе не применимы к рассматриваемой установке (например, взаимодействие натрия с водой в водо-водяном реакторе или забивание трубок парогенератора моллюсками при работающем блоке). Исключением является также невозможность распространения затопления на более верхние отметки из-за действия гравитации.

На основании вышеприведенных рассуждений в проекте АЭС «Аккую» принцип «практического исключения» сформулирован следующим образом: для АП или явлений, способствующих или приводящих к неприемлемым радиологическим последствиям для населения или окружающей среды, должно быть с высоким уровнем доверия показано, что их реализация крайне маловероятна. При этом критерий для отнесения АП или явления к «крайне маловероятным» варьируется в зависимости от того, приводит АП или явление непосредственно к неприемлемым радиологическим последствиям или имеются дополнительные условия для создания таких последствий.

АЭС «Аккую» – строящаяся атомная электростанция на средиземноморском побережье Турции. АЭС «Аккую» сооружается по российскому проекту, включающему в себя строительство и ввод в эксплуатацию четырех энергоблоков с реакторами типа ВВЭР-1200. АО «Атомэнергoproject» является Генеральным проектировщиком АЭС «Аккую».

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА «ПРАКТИЧЕСКОГО ИСКЛЮЧЕНИЯ» НА УРОВНЕ АВАРИЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ, ПРИВОДЯЩИХ К БОЛЬШОМУ АВАРИЙНОМУ ВЫБРОСУ

Для указанных АП, непосредственно ведущих к неприемлемым радиологическим последствиям, критерием «крайней маловероятности» принято значение вероятности их реализации равное, $1E-7$ на реактор в год, при дополнительном условии, что суммарная вероятность таких последовательностей должна быть такой, чтобы критерий ограниченного воздействия (Criterion for Limited Impact, CLI) был ниже $1E-6$ на реактор в год. В соответствии с [6] критерий ограниченного воздействия – это критерий приемки, определяемый сравнением линейного сочетания семейств выбросов радиоизотопов с максимальным значением этих выбросов. Каждый критерий соответствует определенному виду ограниченных последствий для населения.

Для обеспечения выполнения указанного критерия в проектах АЭС предусмотрен ряд технических мер, предназначенных для снижения вероятности реализации аварийных последовательностей, ведущих к большому или раннему большому аварийному выбросу. В рамках вероятностного анализа безопасности (ВАБ) уровня 1 выявлены все АП, приводящие к тяжелому повреждению ядерного топлива и, следовательно, к большому или раннему аварийному выбросу.

Следует отметить, что все выявленные последовательности, вызываемые учтенными в проекте исходными событиями (ИС), потенциально ведущие к большому или раннему большому аварийному выбросу, в той или иной мере учтены концепцией глубоко эшелонированной защиты (ГЭЗ) [7].

По результатам ВАБ уровня 1 для АЭС «Аккую» в Турции показано, что для внутренних ИС при работе блока на мощности ни одна комплексная АП, включающая в себя исходное событие, случайные отказы оборудования и (или) ошибки персонала и приводящая к тяжелой аварии, не имеет вероятность выше $1E-8$ на реактор в год. Для реактора, работающего на мощности, это обеспечивается совмещением выполнения функций безопасности двумя каналами активных систем безопасности (каждый с 100%-ным внутренним резервированием) и пассивными системами (гидроемкостями первой и второй ступени и системой пассивного отвода тепла). Для оставленного реактора в период планово-предупредительного ремонта при выведен-

ном в ремонт канале систем безопасности также обеспечивается значение вероятности для АП, ведущих к повреждению ядерного топлива, ниже $1E-8$ на реактор в год за счет работы оставшегося канала активных систем безопасности, включая системы отвода тепла от бассейна выдержки, и пассивных систем безопасности.

Надежность работы систем 1–3 уровней ГЭЗ подтверждается низкой суммарной вероятностью повреждения твэлов, оцененной как $6E-6$ на реактор в год для всех внутренних ИС и для всех режимов работы блока.

Следует отметить, что для всех АП, приводящих к нарушению 1–3-го уровней ГЭЗ, в проекте АЭС «Аккую» реализованы средства на четвертом уровне ГЭЗ, препятствующие переходу на пятый уровень (устройство локализации расплава, спринклерная система, дополнительная система отвода тепла от бассейна выдержки). Эффективность этих систем подтверждается тем, что суммарная вероятность большого аварийного выброса в проекте АЭС «Аккую» оценена как $6,17E-7$ на реактор в год.

По результатам ВАБ АЭС «Аккую» в проекте показано, что каждая из АП, приводящих к неприемлемым выбросам в проекте блока, имеет вероятность реализации ниже $4,45E-8$ на реактор в год, при том что суммарная их вероятность не превышает $6,17E-7$ на реактор в год.

Таким образом, в проекте АЭС «Аккую» показано, что реализация принципа ГЭЗ и использование как активных, так и пассивных систем для выполнения основных функций безопасности гарантируют выполнение критерия «крайне малой вероятности», указанного выше.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА «ПРАКТИЧЕСКОГО ИСКЛЮЧЕНИЯ» ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ГЕРМЕТИЧНОЙ ОБОЛОЧКЕ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ

В проекте рассмотрен ряд явлений, реализация которых может способствовать возникновению неприемлемых аварийных выбросов:

- детонация водорода;
- большой тепловой взрыв;
- непосредственный нагрев герметичной оболочки;
- превышение давления в объеме герметичной оболочки;
- разрушение герметичной оболочки на поздних этапах из-за расплавления фундамента.

Каждый из указанных эффектов проявляется в сценариях тяжелых аварий, приводящих к повреждению твэлов при внутренних ИС, внутривыпускных и внешних воздействиях, суммарная вероятность возникновения которых не превышает $1E-5$ на реактор в год. При этом даже в случае реализации таких сценариев вероятность потери плотности герметичной оболочки, приводящей к большому аварийному выбросу, достаточно низкая.

Критерием «крайне малой вероятности» для этих эффектов принят следующий: вероятность возникновения любого из рассматриваемых сценариев, включающих в себя анализируемые эффекты, не превышает $1E-7$ на реактор в год, при том что суммарная вероятность последовательностей, приводящих к превышению критерия ограниченного воздействия СЛІ [6], не превышает $1E-6$ на реактор в год.

В проекте проанализирована возможность возникновения при тяжелых авариях явлений и процессов, которые могут привести к повреждению герметичной оболочки и, соответственно, к большому или раннему аварийному выбросу.

Детонация водорода

В проекте для предотвращения взрывоопасных концентраций водорода в объеме герметичной оболочки предусмотрена система контроля и удаления водорода, в со-

став которой входят пассивные каталитические рекомбинаторы водорода, устанавливаемые в местах возможного скопления водорода. В соответствии с требованиями [8] проектными основами этой системы являются предотвращения горения водорода при проектных авариях и детонации при запроектных авариях.

При выборе типа рекомбинаторов, их количества и мест размещения учитываются все возможные источники образования водорода с учетом скорости генерации:

- водород, изначально присутствующий в атмосфере герметичной оболочки;
- водород, образуемый в результате пароциркониевой реакции;
- водород, образуемый за счет радиолиза воды в реакторе, бассейне выдержки и в аварийном приемке;
- водород, образуемый в результате доокисления в устройстве локализации расплава, не прореагировавшего на внутрикорпусной стадии аварии циркония.

В модели ВАБ уровня 2 для сценариев тяжелых аварий консервативно рассматривалась возможность детонации, при этом консервативно постулировалось разрушение герметичной оболочки и реализация большого аварийного выброса на стадии аварии до момента снижения концентрации водорода до безопасного уровня за счет утилизации при работе рекомбинаторов. Суммарная вероятность таких АП тяжелых аварий с детонацией оценена с использованием модели ВАБ уровня 2 значением $6,05E-8$ на реактор в год, при этом вероятность реализации наиболее значимого сценария с детонацией менее $2,87E-9$ на реактор за год.

Большой тепловой взрыв

Внутрикорпусной взрыв физически возможен, но, как показывают международные исследования [9], имеет крайне низкую условную вероятность реализации (менее $1E-5$). Учитывая, что это событие возможно только при полном расплавлении ядерного топлива, которое происходит в случае, когда в корпусе реактора практически нет воды, общая вероятность такого явления ниже $1E-10$ на реактор в год, и оно также «практически исключено».

Внекорпусной паровой взрыв при выходе расплава из корпуса реактора также исключен конструкцией шахты реактора и применением устройства локализации аварии, в котором в момент разрушения корпуса реактора отсутствует вода. Это является особенностью конструкции реактора и шахты ВВЭР-1200. Исключение составляют течи эллиптической части корпуса реактора, при которых вода первого контура может попасть в шахту, однако вероятность такого события оценена величиной ниже $1E-10$ на реактор в год.

Непосредственный нагрев герметичной оболочки

Непосредственный нагрев герметичной оболочки является возможным сценарием тяжелой аварии с разрушением корпуса реактора при высоком давлении в первом контуре. Реализация данных сценариев при запроектной аварии в проекте АЭС «Аккую» исключена следующими проектными решениями:

- установкой импульсных предохранительных устройств компенсатора давления с возможностью управления с помощью дополнительной линии;
- использованием системы аварийного газоудаления для снижения давления в первом контуре;
- отводом тепла от первого контура через систему пассивного отвода тепла.

Суммарная вероятность сценариев с истечением расплава из корпуса реактора при высоком давлении оценивается величиной $6,95E-11$ на реактор в год. Это означает, что суммарная вероятность реализации аварийных последовательностей с большим тепловым взрывом и непосредственным нагревом герметичной оболочки не превышает значение $6,95E-11$ на реактор в год, и само явление «практически исключено».

Превышение давления в объеме герметичной оболочки

Переопрессовка герметичной оболочки предотвращается подачей воды на спринклерные форсунки одной из двух независимых систем:

- спринклерной системы,
- специальных технических средств для управления запроектными авариями.

Системы независимы по электропитанию и управлению. В модели ВАБ уровня 2 для сценариев тяжелых аварий с переопрессовкой герметичной оболочки из-за превышения давления консервативно постулировалось разрушение герметичной оболочки и реализация большого аварийного выброса на поздней стадии тяжелой аварии. Суммарная вероятность таких АП тяжелых аварий оценена с использованием модели ВАБ уровня 2 значением $8,9E-8$ на реактор за год (для всех ИС кроме сейсмических).

Учитывая низкую вероятность каждой из таких АП (менее $5E-8$), можно утверждать, что эти последовательности «практически исключены».

Разрушение герметичной оболочки на поздних этапах из-за расплавления фундамента

В проекте АЭС «Аккую» предусмотрено устройство локализации расплава, исключющее в случае тяжелой аварии непосредственное взаимодействие продуктов расплава активной зоны с бетонными строительными конструкциями шахты реактора.

Устройство локализации расплава является устройством пассивного принципа действия, но его эффективная работа возможна только при успешной работе систем, указанных выше и препятствующих переопрессовке герметичной оболочки.

В модели ВАБ уровня 2 сценарии тяжелых аварий с переопрессовкой герметичной оболочки также приводят к проплавлению ее бетонного основания. Для этих сценариев консервативно постулировалось разрушение герметичной оболочки и реализация большого аварийного выброса на поздней стадии тяжелой аварии. Суммарная вероятность таких АП тяжелых аварий оценена с использованием модели ВАБ уровня 2 значением $8,9E-8$ на реактор за год.

Учитывая низкую вероятность каждой из таких АП (менее $5E-8$) можно утверждать, что эти последовательности «практически исключены».

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА «ПРАКТИЧЕСКОГО ИСКЛЮЧЕНИЯ» ДЛЯ СПЕЦИФИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ

Описанные выше АП и эффекты (явления) имеют достаточно предсказуемые последствия. Также оценка вероятности их реализации может быть выполнена с достаточной степенью уверенности.

Однако в проекте блока АЭС «Аккую» рассматриваются и сценарии аварий, последствия которых трудно оценить, и для них также оценивается применимость принципа «практического исключения»:

- значительный ввод положительной реактивности (включая неоднородное разбавление борного поглотителя);
- разрыв крупномасштабных элементов, находящихся под высоким давлением (например, корпуса реактора и крупномасштабных элементов первого контура);
- разрушение твэлов в хранилище отработанного ядерного топлива (бассейне выдержки);
- тяжелые аварии с потерей целостности герметичной оболочки из-за ее байпаса (например, при разрушении трубок и коллекторов парогенератора, отказе локализирующей арматуры или аварии с течью в смежной системе);
- тяжелые аварии в состоянии реактора, когда герметичная оболочка разгерметизирована или средства устранения последствий тяжелых аварий находятся в неработоспособном состоянии.

Для перечисленных выше сценариев в качестве критерия «крайне малой вероятности» рассматривается выполнение хотя бы одного условия:

У1. вероятность тяжелой аварии ниже $1E-6$ на реактор в год при условии сохранения целостности герметичной оболочки.

У2. вероятность тяжелой аварии ниже $1E-7$ на реактор в год при отсутствии целостности герметичной оболочки (включая байпас герметичной оболочки).

Ниже рассмотрены перечисленные сценарии в контексте применения этих двух критериев.

Значительный ввод положительной реактивности (включая неоднородное разбавление борного поглотителя)

Анализами, представленными в предварительном отчете по оценке безопасности АЭС «Аккую», показано, что даже при ошибочной подаче чистого конденсата на всас насосов подпитки АП приведет к срабатыванию аварийной защиты реактора первого рода и переводу блока в безопасное состояние. Вероятность тяжелого повреждения топлива для всех перечисленных сценариев ниже $1E-7$ на реактор в год и целостность герметичной оболочки не нарушается, что позволяет утверждать об их «практическом исключении» (Критерий У1). Что касается выброса органов регулирования в количестве, способном привести к критическому вводу реактивности, то такие аварии ограничены траверсой, что «практически их исключает».

Разрыв крупномасштабных элементов, находящихся под высоким давлением (например, корпуса реактора и крупномасштабных элементов первого контура)

В соответствии с требованием [7], разрывы (отказы) корпуса реактора, изготовление и эксплуатация которого осуществляется в соответствии с наивысшими требованиями норм и правил, в число нарушений нормальной эксплуатации, проектных и запроектных аварий, требующих дополнительного анализа безопасности реакторной установки, не включаются, если показано, что вероятность разрушения корпуса реактора не превышает $1E-7$ на реактор в год.

При изготовлении корпуса реактора и оборудования первого контура применяются высококачественные материалы, механические характеристики которых имеют значительный запас по отношению к рабочим параметрам реакторной установки и обеспечивают срок службы оборудования не менее 60-ти лет.

Вероятность разрушения корпуса реактора оценивается в проекте реакторной установки и ВАБ уровня 1 как $1,1E-10$ на реактор в год.

Последствия разрушения других сосудов первого контура ограничиваются диаметром присоединенного трубопровода и учитываются проектом. Вероятность сценария таких аварий ниже $1E-7$ на реактор в год, что позволяет утверждать об их «практическом исключении» (Критерий У1).

Разрушение твэлов в хранилище отработанного топлива (бассейне выдержки)

Повреждение твэлов в бассейне выдержки (БВ) «практически исключено» за счет:

- наличия большого начального запаса воды в БВ;
- работы спринклерной системы, обеспечивающей отвод тепла от БВ в режимах нормальной эксплуатации;
- резервирования спринклерной системы системой аварийного и планового расхолаживания по функции отвода тепла от БВ;
- возможности подпитки БВ от системы гидроемкостей;
- возможности подпитки БВ от системы подачи воды на очистку;
- специальных средств управления запроектными авариями (мобильного оборудования);

- дополнительной системы охлаждения БВ, независимой от штатных систем технической воды и электроснабжения.

Вероятность повреждения твэлов в БВ (с учетом течей через облицовку БВ) суммарно для всех сценариев оценена в ВАБ уровня 1 как $4,73E-08$ на реактор в год, при том что ни один сценарий не имеет вероятность выше $1,2E-8$ на реактор в год (что позволяет говорить об их «практическом исключении»). Такая низкая вероятность обеспечивается большим запасом воды в БВ и наличием различных путей отвода тепла и пополнения воды в БВ.

Вероятность тяжелого повреждения ядерного топлива в БВ составляет значение меньше $1E-7$ на реактор в год, а целостность герметичной оболочки нарушается с низкой вероятностью, что позволяет утверждать об их «практическом исключении» (Критерий У1).

Тяжелые аварии с потерей целостности герметичной оболочки из-за ее байпаса (например, при разрушении трубок или коллекторов парогенератора, отказе на закрытие отсечных клапанов герметичной оболочки или аварии с течью в смежной системе)

Байпас герметичной оболочки возможен в следующих принципиально отличных случаях:

- течах из первого во второй контур;
- течах за пределы герметичной оболочки через смежные системы;
- течах через линию продувки первого контура;
- отказе системы локализации герметичной оболочки.

Для каждого из них в проекте АЭС «Аккую» предусмотрены защитные меры, снижающие вероятность негативных последствий, а именно, повреждения твэлов. Следует отметить, что при повреждении твэлов в сценариях с байпасом герметичной оболочки в ВАБ уровня 2 постулировался поздний большой аварийный выброс (если расчетами не была показана возможность прекращения выброса за пределы герметичной оболочки после плавления ядерного топлива).

Для течи из первого контура во второй в проекте разработан специальный алгоритм реагирования, позволяющий эффективно бороться с такими авариями. Повреждение твэлов и непосредственный выброс радиоактивных веществ в окружающую среду возможны при открытии и отказе на закрытие паросбросных устройств на аварийном парогенераторе или отказе отвода тепла от второго контура через неаварийные парогенераторы. Суммарная вероятность таких АП тяжелых аварий оценена по логико-вероятностной модели ВАБ уровня 1 значением $2,95E-8$ на реактор в год, что позволяет говорить о «практическом исключении» таких сценариев (критерий У2).

Другие сценарии с байпасом герметичной оболочки (течи через смежные системы и через линию продувки) приводят к повреждению ядерного топлива с вероятностью, меньшей, чем $1E-7$ на реактор в год, что также позволяет сделать вывод о «практическом исключении» (критерий У2).

В проекте приняты меры, обеспечивающие надежную работу системы локализации герметичной оболочки (надежное питание локализующей арматуры на время более 72 часов с использованием принципов независимости, резервирования и разнообразия). Для АП тяжелой аварии с незакрытием клапанов системы изоляции герметичной оболочки в ВАБ уровня 2 консервативно постулировалась реализация большого аварийного выброса. Суммарная вероятность таких АП тяжелых аварий оценена значением $2,9E-8$ на реактор в год, что также позволяет сделать вывод о «практическом исключении» (критерий У2).

Тяжелые аварии в состоянии реактора, когда герметичная оболочка разгерметизирована или средства устранения последствий тяжелых аварий находятся в неработоспособном состоянии

Герметичная оболочка может быть разгерметизирована либо в случае отказа систем локализации при возникновении ИС при работе на мощности, либо во время транспортно-технологических операций во время планово-предупредительного ремонта.

Для АП тяжелой аварии с незакрытием клапанов системы изоляции герметичной оболочки в ВАБ уровня 2 консервативно постулировалась реализация большого аварийного выброса. Суммарная вероятность таких АП тяжелых аварий оценена значением $2,9E-8$ на реактор в год, что также позволяет сделать вывод об их «практическом исключении» (критерий У2).

Вероятность возникновения тяжелой аварии в режимах с остановленным реактором минимизирована за счет возможности использования запасов воды в гидроемкостях для подпитки реактора и бассейна выдержки, включения в проект дополнительной системы (в дополнение к системам аварийного и планового расхолаживания) для отвода остаточных тепловыделений от реактора и бассейна выдержки с независимыми от систем безопасности электроснабжением и охлаждением технической водой. Характеристики предусмотренных в проекте специальных средств для управления запроектной аварией и дополнительной системы отвода тепла от бассейна выдержки также достаточны для обеспечения сохранности ядерного топлива. Суммарная вероятность таких АП тяжелых аварий оценена значением $2,9E-8$ на реактор в год, что также позволяет сделать вывод о «практическом исключении» (критерий У2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам рассмотрения «практически исключенных» АП и явлений можно сделать обоснованный вывод, что все они подкреплены релевантными свидетельствами и соответствующими анализами. Оцененное в ВАБ уровня 2 значение вероятности большого аварийного выброса $6,17E-7$ на реактор в год подтверждает безопасность АЭС «Аккую» с учетом технических и организационных мер, реализованных в проекте станции.

Для того, чтобы обеспечить надежность полученных низких вероятностных оценок, позволяющих заявлять о «практическом исключении» рассмотренных явлений из-за их пренебрежимо малой вероятности, в ВАБ уровня 2 выполнен анализ чувствительности, показавший, что оцененные значения мало зависят от допущений и предположений анализа, а также от случайного изменения параметров, влияющих на развитие тяжелых аварий, не учитываемых в ВАБ.

Литература

1. *I. Kuzmina, D. Noskov, D. Simin, S. Afonin, K. Avdjiev, Y. Aleksyev.* Insights on Application of Some Probabilistic Considerations for Licensing of New Nuclear Power Plants // RAOS Project OY, presented at International Conference on Topical Issues in Nuclear Installation Safety: Strengthening Safety of Evolutionary and Innovative Reactor Designs, 18–21 October 2022, Vienna, Austria.
2. Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, INSAG Series No. 75-INSAG-3 (Rev. 1), INSAG-12. Vienna: International Atomic Energy Agency – 1999.
Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1082r_web.pdf (дата обращения: 01.01.2023).
3. Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-4.- Vienna: International Atomic Energy Agency – 2010.
Электронный ресурс: <https://www.iaea.org/publications/8236/development-and-application->

of-level-2-probabilistic-safety-assessment-for-nuclear-power-plants (дата обращения: 01.01.2023).

4. Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1), – Vienna: International Atomic Energy Agency – 2016. Электронный ресурс: [https://ucleus.iaea.org/sites/gsan/lib/Document safety %20of%20Nuclear% 20Power %20Plants% 20Design%20\(SSR-2-1\)%20.pdf](https://ucleus.iaea.org/sites/gsan/lib/Document%20safety%20of%20Nuclear%20Power%20Plants%20Design%20(SSR-2-1)%20.pdf) (дата обращения: 01.01.2023).

5. IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2018 Edition. – Vienna: International Atomic Energy Agency – 2018.

Электронный ресурс: <https://www.iaea.org/publications/11098/iaea-safety-glossary-2018-edition> (дата обращения: 01.01.2023).

6. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants (EUR). Volume 1,2, Revision E, – EUR Organisation – 2016. Электронный ресурс: <https://www.europeanutilityrequirements.eu/EURdocument/EURVolume1,2,4.aspx> (дата обращения: 01.01.2023).

7. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций – М.: Ростехнадзор России, 2015. – 55 с.

8. НП-040-02. Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции. – М.: Госатомнадзор России, 2002. – 6 с.

9. NUREG-1150. Severe Accident Risks: An Assessment for Five US Nuclear Power Plants, Rep., – Washington, DC: United States Nuclear Regulatory Commission – 1990. Электронный ресурс: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1150/index.htm> (дата обращения: 01.01.2023).

Поступила в редакцию 14.02.2023

Авторы

Любарский Артур Вадимович, начальник управления, канд. техн. наук,

E-mail: Lyubarskiy_AV@aep.ru

Токмачев Геннадий Владимирович, главный специалист, канд. техн. наук,

E-mail: Tokmachev_GV@aep.ru

Кузьмина Ирина Борисовна, эксперт, канд. техн. наук,

E mail: IBo.kuzmina@rosatom.ru

UDC 621.039.586

«Practical Elimination» Principle in the Akkuyu Nuclear Power Plant Design

Lyubarskiy A.V. *, Tokmachev G.V. *, Kuzmina I.B. **

* Atomenergoproekt JSC

7 Bakuninskaya Str., bldg. 1, 107996 Moscow, Russia

** REIN Engineering JSC

10 Letnikovskaya Str., bldg. 5, 115114 Moscow, Russia

ABSTRACT

The paper considers the implementation of the «practical elimination» principle in the design of the Akkuyu NPP with VVER-1200 reactors under construction in Turkey. The «practical elimination» principle is defined as follows: for emergency sequences or phenomena that contribute or lead to unacceptable radiological consequences for the public or the environment, it shall be shown with a high level of confidence that their occurrence is highly unlikely.

«Practical elimination» is proved predominantly by results of a Level 2 probabilistic safety assessment. The implementation of the «practical elimination» principle was considered at the level of accident sequences leading to a large radioactive release. It has been shown that each accident sequence leading to an unacceptable release has the

probability of occurrence below $4.45E-8$ per reactor per year, while their total probability not exceeding the value of $6.17E-7$ per reactor per year. For the phenomena in the containment area during severe accidents, including hydrogen detonation, a large thermal explosion, direct containment heating, overpressure in the containment volume, and the containment damage at later stages due to the basement melting through, their «practical elimination» has been shown. The paper also considers specific hard-to-predict scenarios of beyond design basis accidents, for which the applicability of the «practical elimination» principle is assessed as well: a major positive reactivity insertion, a rupture of the reactor pressure vessel and other large-scale components, damage of fuel elements in the spent fuel pool, severe accidents with the containment bypass or containment failure, and severe accidents with the means for coping with their consequences being unavailable. Criteria have been developed and used for the «practical elimination» assessment. A sensitivity analysis was undertaken as part of the Level 2 probabilistic safety assessment which has shown that estimated values depend slightly on the analytical assumptions, as well as on the random change in the parameters that affect the progression of severe accidents.

Key words: nuclear power plant, design development, safety, «practical elimination» principle, Level 2 Probabilistic Safety Assessment.

For citation: Lyubarskiy A.V., Tokmachev G.V., Kuzmina I.B. «Practical Elimination» Principle in the Akkuyu Nuclear Power Plant Design. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 3, pp. 19-30; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.02> (in Russian).

REFERENCES

1. I. Kuzmina, D. Noskov, D. Simin, S. Afonin, K. Avdjiev, Y. Aleksyev. Insights on Application of Some Probabilistic Considerations for Licensing of New Nuclear Power Plants // RAOS Project OY, presented at International Conference on Topical Issues in Nuclear Installation Safety: Strengthening Safety of Evolutionary and Innovative Reactor Designs, 18–21 October 2022, Vienna, Austria.
2. Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, INSAG Series No. 75-INSAG-3 (Rev. 1), INSAG-12. Vienna: International Atomic Energy Agency – 1999. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1082r_web.pdf (accessed Jan. 1, 2023)
3. Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-4. - Vienna: International Atomic Energy Agency – 2010. Available at: <https://www.iaea.org/publications/8236/development-and-application-of-level-2-probabilistic-safety-assessment-for-nuclear-power-plants> (accessed Jan. 1, 2023)
4. Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1), – Vienna: International Atomic Energy Agency – 2016. Available at: [https://nucleus.iaea.org/sites/gsan/lib/Documents/Safety%20of%20Nuclear%20Power%20Plants%20Design%20\(SSR-2-1\)%20.pdf](https://nucleus.iaea.org/sites/gsan/lib/Documents/Safety%20of%20Nuclear%20Power%20Plants%20Design%20(SSR-2-1)%20.pdf) (accessed Jan. 1, 2023)
5. IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2018 Edition. – Vienna: International Atomic Energy Agency – 2018. Available at: <https://www.iaea.org/publications/11098/iaea-safety-glossary-2018-edition> (accessed Jan. 1, 2023)
6. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants (EUR). Volume 1,2, Revision E, – EUR Organisation – 2016. Available at: <https://www.europeanutilityrequirements.eu/EURdocument/EURVolume1,2,4.aspx> (accessed Jan. 1, 2023)
7. NP-001-15. General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants. Moscow: Rostekhnadzor of Russia, 2015. – 55 c. (in Russian)
8. NP-040-02. Rules for ensuring hydrogen explosion protection at a nuclear power plant. – Moscow: Gosatomnadzor of Russia, 2002. – 6 p. (in Russian)

9. NUREG-1150. Severe Accident Risks: An Assessment for Five US Nuclear Power Plants, Rep., – Washington, DC: United States Nuclear Regulatory Commission – 1990.
Available at: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1150/index.htm>
(accessed Jan. 1, 2023)

Authors

Artur V. Lyubarskiy, Head of Division, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: Lyubarskiy_AV@aep.ru

Gennady V. Tokmachev, Chief Expert, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: Tokmachev_GV@aep.ru

Irina B. Kuzmina, Expert, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: IBoKuzmina@rosatom.ru